

**С.М. Пересада**, канд.техн.наук (НТУУ “КПИ”, Киев), **И.А. Шаповал** (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев), **С.В. Король** (НТУУ “КПИ”, Киев),

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ**

Виконано експериментальні випробування алгоритмів керування машиною подвійного живлення (МПЖ) з матричним перетворювачем (МП) в колі ротора. Всі алгоритми керування МПЖ виконувались в реальному часі, використовуючи DSP контролер, і успішно випробувані на експериментальному стенді. Експериментально продемонстровано, що алгоритми керування МПЖ гарантують точне відпрацювання позитивної і негативної траєкторій заданого моменту та заданої траєкторії швидкості за умови одиничного коефіцієнту потужності статорної ланки. Експериментально показано, що запропонований алгоритм ініціалізації електромеханічної системи гарантує м'яке, без перехідних процесів, підключення МПЖ до мережі.

Выполнены экспериментальные исследования алгоритмов управления машиной двойного питания (МДП) с матричным преобразователем (МП) в цепи ротора. Все алгоритмы управления МДП выполнялись в реальном времени, используя DSP котроллер, и успешно протестированы на экспериментальном стенде. Экспериментально продемонстрировано, что алгоритмы управления МДП гарантируют точную отработку положительной и отрицательной траекторий заданного момента и заданной траектории скорости при условии единичного коэффициента мощности статорной цепи. Экспериментально показано, что предложенный алгоритм инициализации электромеханической системы гарантирует мягкое, без переходных процессов, подключение МДП к сети.

Full-scale experimental testing of the doubly-fed induction machine (DFIM) control algorithms with matrix converter (MC) at rotor side is performed. All DFIM control algorithms have been implemented in real time using DSP-controller and successfully tested on the experimental set-up. It is experimentally demonstrated that DFIM control algorithms guarantee perfect torque tracking of positive and negative trajectories of torque reference and speed reference under condition of unity stator side power factor. It is demonstrated by experiments that proposed initialisation control algorithm of the electromechanical system guarantees soft transientless connection of DFIM to the line grid.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В [1], [2] авторами предложено новое общетеоретическое решение задачи управления моментом и угловой скоростью машины двойного питания (МДП) при стабилизации коэффициента мощности статорной цепи на единичном уровне. В [1] приведено общее решение задачи управления моментом и потоком МДП, гарантирующее глобальную асимптотическую отработку заданных траекторий изменения момента. Предложенное решение не использует упрощающих допущений и базируется на косвенной ориентации по вектору потокосцепления статора в системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети, которая не зависит от параметров электрической машины. Результат [1] распространен на задачу управления угловой скоростью [2], где представлено общее, теоретически обоснованное, решение задачи отработки угловой скорости при стабилизации единичного коэффициента мощности статорной цепи, базирующееся на принципе пассивности в управлении нелинейными системами. Показано, что алгоритм управления угловой скоростью гарантирует асимптотическую отработку угловой скорости при одновременной компенсации неизвестного постоянного момента нагрузки.

В отличие от АД с короткозамкнутым ротором, МДП питается как со стороны статора, так и со стороны ротора. Поэтому, для избежания нарушения физики управления электрической машиной и мягкого подключения МДП к сети, необходима специальная процедура инициализации. В данной статье представлен алгоритм управления МДП на этапе синхронизации и подключения к сети. При работе МДП в режиме генератора эта процедура включает: разгон приводного двигателя до скорости близкой к синхронной, синхронизацию вектора ЭДС статорных обмоток МДП с вектором напряжения сети и подключение статорных обмоток к сети. Благодаря этому достигается мягкое подключение МДП к сети, в идеализированном случае без переходных процессов.

Несмотря на то, что исследованию МДП посвящено большое количество работ, и такие системы выпускаются рядом зарубежных фирм, в литературе приведено ограниченное количество экспериментальных результатов полномасштабного тестирования МДП как в генераторном, так и в двигательном режимах. В данной статье даны результаты экспериментального исследования алгоритма отработки заданного момента и стабилизации реактивной мощности статора на нулевом уровне [1], в генераторном и двигательном режимах, и алгоритма отработки заданной скорости [2] и реактивной мощности статора – в двигательном режиме. Экспериментально доказано, что предложенные алгоритмы управления удовлетворяют требованиям для высокودинамичных применений, как в системах генерирования энергии, так и в системах электропривода.

## **ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Включение МДП в режиме генератора осуществляется в следующей последовательности. Сначала запускается первичный двигатель, а МДП при этом не задействована. Когда скорость вращения достигает скорости близкой к синхронной, в цепь ротора подается напряжение. На этом

этапе алгоритм управления синхронизирует вектор ЭДС статора по амплитуде и по фазе с вектором напряжения сети. Когда синхронизация выполнена, статор подключается к сети питания с гарантированным мягким подключением без возникновения переходного процесса. Устройство управления обеспечивает обработку нулевого момента (“подключение” машины). После этого МДП готова к обработке заданного момента.

Алгоритм управления возбуждением МДП проектируется следующим образом. Модель МДП с разомкнутой статорной цепью и одной парой полюсов в системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети, имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{i}_{2d} &= -\frac{R_2}{L_2}i_{2d} + (\omega_1 - \omega)i_{2q} + \frac{1}{L_2}u_{2d} \\ \dot{i}_{2q} &= -\frac{R_2}{L_2}i_{2q} - (\omega_1 - \omega)i_{2d} + \frac{1}{L_2}u_{2q},\end{aligned}\tag{1}$$

а вектор ЭДС, наводящийся в статоре, запишется:

$$\begin{aligned}E_d &= \frac{L_m}{L_2}(u_{2d} - R_2i_{2d} - \omega L_2i_{2q}) \\ E_q &= \frac{L_m}{L_2}(u_{2q} - R_2i_{2q} + \omega L_2i_{2d}),\end{aligned}\tag{2}$$

где  $\mathbf{u}_2 = (u_{2d}, u_{2q})^T$ ,  $\mathbf{i}_2 = (i_{2d}, i_{2q})^T$  - векторы напряжений и токов ротора,  $\omega_1$  - постоянная угловая скорость вращения вектора напряжения сети,  $\omega$  - угловая скорость ротора,  $R_2, L_2$  - сопротивление и индуктивность обмоток ротора,  $L_m$  - индуктивность намагничивания.

Алгоритм управления токами ротора спроектируем в следующем виде:

$$\begin{aligned}u_{2d} &= L_2 \left( \frac{R_2}{L_2}i_{2d}^* - (\omega_1 - \omega)i_{2q}^* - k_i \tilde{i}_{2d} + v_d \right) \\ u_{2q} &= L_2 \left( \frac{R_2}{L_2}i_{2q}^* + (\omega_1 - \omega)i_{2d}^* - k_i \tilde{i}_{2q} + v_q \right) \\ \dot{v}_d &= -k_{ii} \tilde{i}_{2d} \\ \dot{v}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_{2q},\end{aligned}\tag{3}$$

где  $(k_i, k_{ii}) > 0$  коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих ПИ регулятора тока,  $i_{2d}^*, i_{2q}^*$  - заданные значения составляющих тока ротора,  $\tilde{i}_{2d} = i_{2d} - i_{2d}^*$ ,  $\tilde{i}_{2q} = i_{2q} - i_{2q}^*$  - ошибки обработки этих составляющих.

Для постоянных заданных значений токов ротора, уравнения ЭДС и динамика ошибок токов ротора на этапе возбуждения имеют вид:

$$\begin{aligned} E_d &= L_m \left[ -\left( \frac{R_2}{L_2} + k_i \right) \tilde{i}_{2d} - \omega \tilde{i}_{2q} - \omega_1 i_{2q}^* + v_d \right] \\ E_q &= L_m \left[ -\left( \frac{R_2}{L_2} + k_i \right) \tilde{i}_{2q} + \omega \tilde{i}_{2d} + \omega_1 i_{2d}^* + v_q \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{i}}_{2d} &= -\left( \frac{R_2}{L_2} + k_i \right) \tilde{i}_{2d} + \omega \tilde{i}_{2q} + v_d \\ \dot{\tilde{i}}_{2q} &= -\left( \frac{R_2}{L_2} + k_i \right) \tilde{i}_{2q} - \omega \tilde{i}_{2d} + v_q. \end{aligned} \quad (5)$$

Подсистема токов ротора (5) линейна и глобально асимптотически устойчива при всех  $(k_i, k_{ii}) > 0$ . Для определения задания ЭДС отметим, что вектор напряжения сети питания располагается на оси d, потому задания для ЭДС статорной цепи МДП записываются

$$\begin{aligned} E_d^* &= U_m, \\ E_q^* &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $U_m$  - постоянная амплитуда вектора напряжения сети.

Из (4) и (6), заданные значения токов ротора будут иметь вид:

$$\begin{aligned} i_{2d}^* &= 0, \\ i_{2q}^* &= -\frac{U_m}{L_m \omega_1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (4) и (5) можно сделать вывод, что скорость переходных процессов при возбуждении МДП определяется динамикой подсистемы токов ротора (5), т.е. выбором коэффициентов регулятора тока  $k_i, k_{ii}$ . Отметим, что: а) задания для токов (7) такие же, как и в [1], при заданном моменте  $T^* = 0$ ; б) структура регулятора тока (3) является частью общего регулятора момента (23) в [1].

При работе МДП в двигательном режиме разгон МДП обычно осуществляется с помощью дополнительных резисторов в роторе, либо при помощи полупроводникового устройства мягкого пуска. При этом, когда скорость МДП входит в зону регулирования (определяется максимальным напряжением цепи ротора), активируется алгоритм регулирования скорости с начальным значением заданной угловой скорости, равным реальной.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ

Алгоритмы отработки момента и скорости [1], [2] были экспериментально исследованы, используя машину двойного питания мощностью 1 кВт, номинальные параметры которой приведены в Приложении. Тестирование всех алгоритмов управления проводилось с использованием экспериментальной установки, блок-схема которой показана на Рис. 1. Экспериментальная установка включает:

1. АД с фазным ротором, который питается от 6 кВА матричного преобразователя с частотой коммутации 5 кГц и с "мертвым временем" 1,2 мкс.
2. Машину постоянного тока, которая может работать, как в режиме регулирования момента, так и стабилизации скорости вращения ротора МДП при работе ее в режиме генератора.
3. Контроллер реального времени dSPACE DS1102 на базе цифрового сигнального процессора (TMS320C31), подключенного к шине персонального компьютера. Такт квантования по времени, равный 200 мкс. был установлен для всех тестов.
4. Датчики тока и напряжения LEM, выходные сигналы которых предварительно отфильтрованы с помощью фильтров, имеющих частоту среза 2 кГц.
5. Фотоимпульсный датчик скорости с разрешающей способностью 5000 имп/об использовался для измерения скорости и углового положения.
6. Персональный компьютер для программирования, отладки и реализации функций автоматики, виртуального осциллографа и интерфейса оператора.

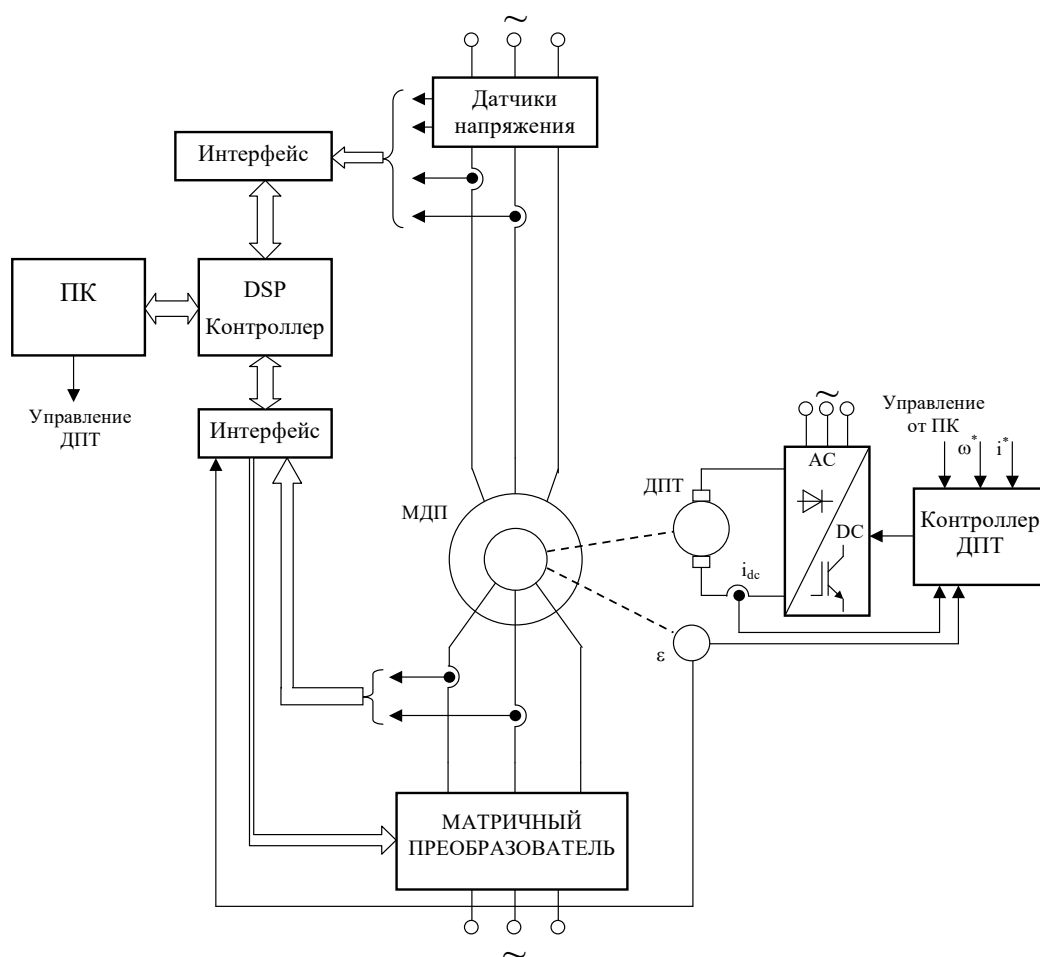


Рис. 1.

Коэффициенты пропорциональной и интегральной частей регуляторов тока ротора и скорости приняты  $k_i = 500$ ,  $k_{ii} = 60000$ ,  $k_\omega = 50$ ,  $k_{\omega i} = 500$ . Постоянная времени вспомогательного

фильтра  $\tau = 8 \cdot 10^{-4}$ . Все программы написаны на языке программирования C<sup>++</sup>. Дискретная версия алгоритма управления получена с использованием метода Эйлера.

В первом блоке экспериментов, показанном на Рис. 2.а и 2.б, исследуется поведение системы при отработке заданного момента в генераторном режиме. Последовательность управления в данном режиме показана на Рис. 2.а: МДП, подключенная к питающей сети, обрабатывает трапецеидальное задание момента, которое, начиная с момента времени  $t = 0.2$  с, на протяжении 0.1 с, нарастает от нулевого значения момента до номинального значения -10 Нм. Отметим, что поток МДП при отработке траектории момента с единичным коэффициентом мощности статорной цепи не является постоянным, как обычно это принимается при пренебрежении активным сопротивлением статора и ориентации управления по полю машины. На Рис.2.б показаны переходные процессы переменных МДП при отработке момента, из которых следует, что ошибки отработки токов ротора находятся на нулевом уровне, реактивная составляющая статорного тока также равна нулю на протяжении всего теста (ненулевое значение теоретически возможно только, когда производная от заданного момента не равна нулю). В результате, ток фазы статора, показанный на Рис.2.б, сдвинут по фазе на  $180^\circ$  относительно напряжения сети питания, и имеет малое содержание высших гармоник. Процессы при отработке момента в двигательном режиме показаны на Рис. 3.

На Рис. 4 показаны процессы при вариации скорости МДП в режиме генерирования постоянного (номинального) момента. На протяжении теста скорость первичного двигателя изменялась выше и ниже синхронной скорости МДП (104 рад/с). По реакции токов статора и ротора можно сделать вывод об удовлетворительной компенсации возмущения, вызванного изменением скорости ротора МДП. Переходные процессы при полном цикле работы системы преобразования энергии показаны на Рис. 5. Последовательность работы МДП включает: запуск первичного двигателя; возбуждение и синхронизацию МДП, начиная с момента времени  $t = 0.5$  с; подключение к сети питания при  $t = 0.8$  с; начало отработки заданного момента, начиная с  $t = 1.2$  с; снижение скорости первичного двигателя до скорости ниже синхронной, начиная с  $t = 1.6$  с. Рис. 5.а демонстрирует полный цикл работы МДП в генераторном режиме, а Рис. 5.б в двигательном соответственно. Графики переходных процессов для полного цикла управления свидетельствуют о высоком качестве синхронизации вектора ЭДС управляемой МДП и вектора напряжения сети при использовании алгоритма возбуждения (3) и мягкое подключение статора МДП к сети питания без возникновения переходных процессов. Компонента реактивного тока статора стабилизируется на нулевом уровне на протяжении всех переходных процессов, что подтверждает высокие развязывающие свойства предложенного управления моментом и реактивной мощностью.

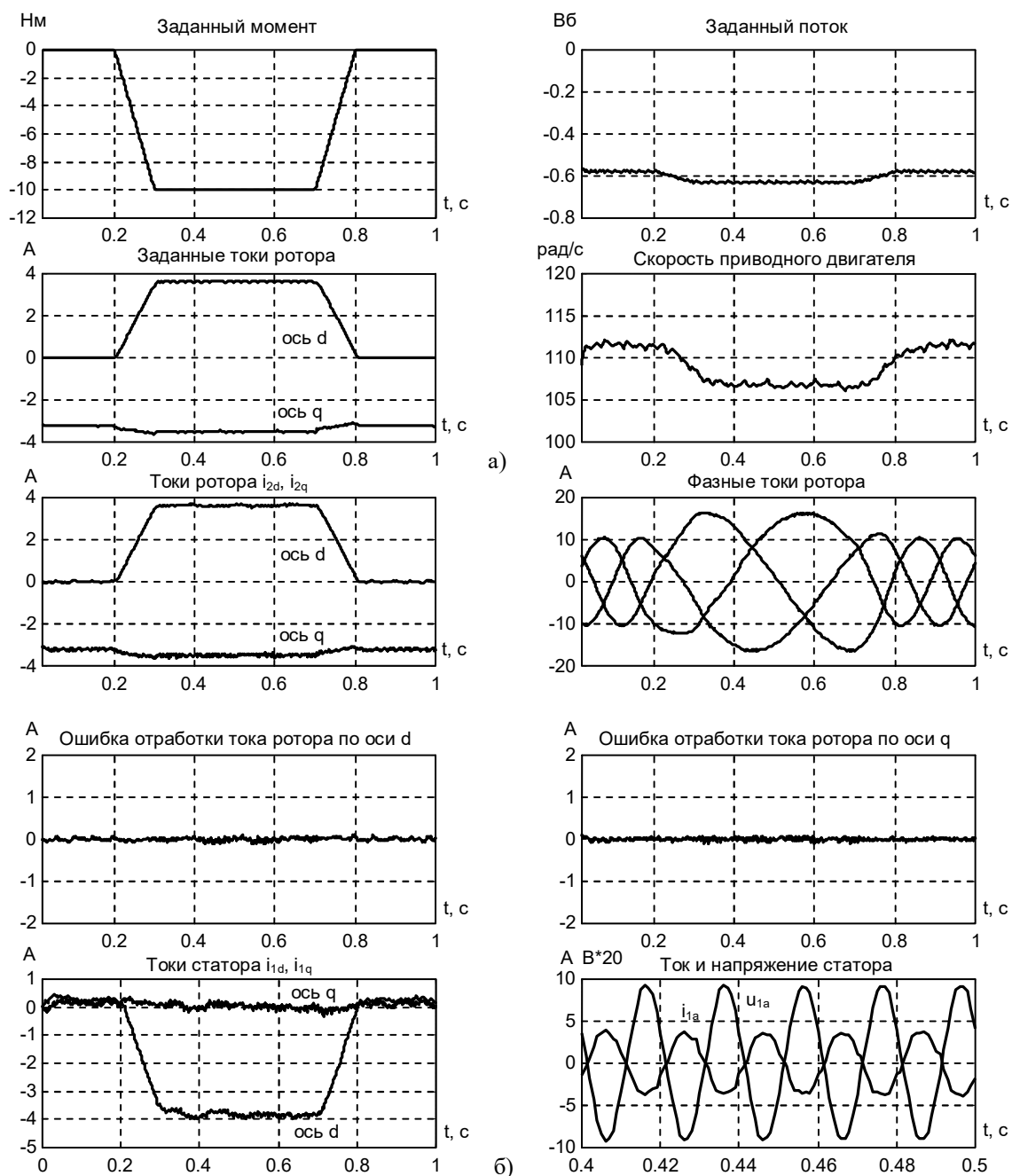


Рис. 2. Переходные процессы при управлении МДП в генераторном режиме.

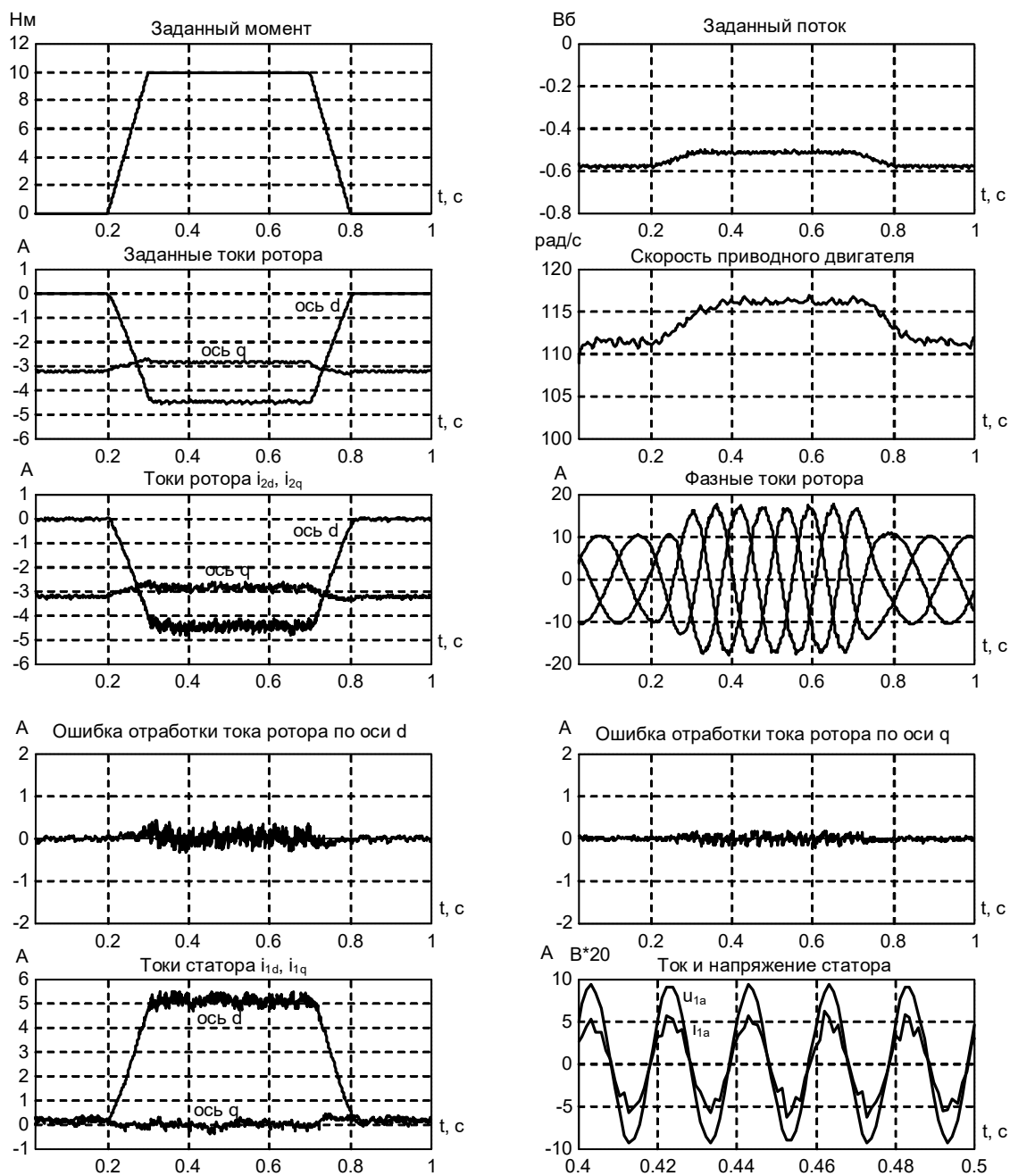


Рис. 3. Переходные процессы при управлении МДП в двигательном режиме.



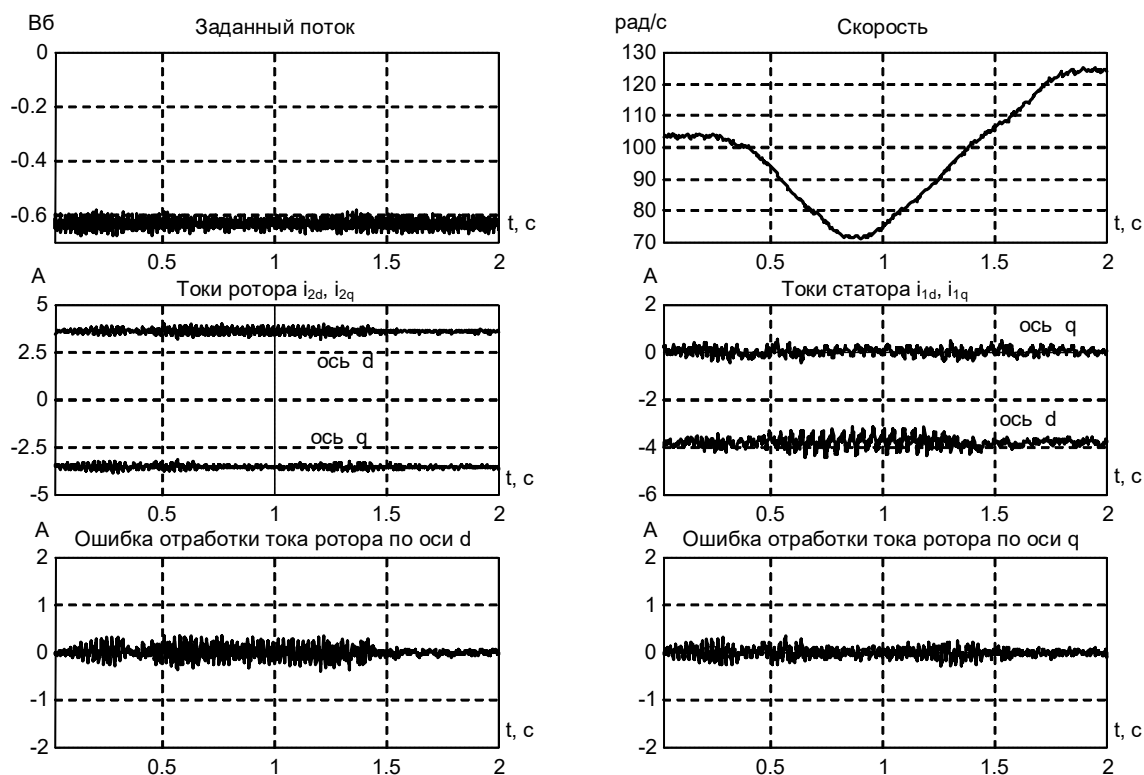


Рис. 4. Переходные процессы при вариации угловой скорости приводного двигателя (генераторный режим МДП).

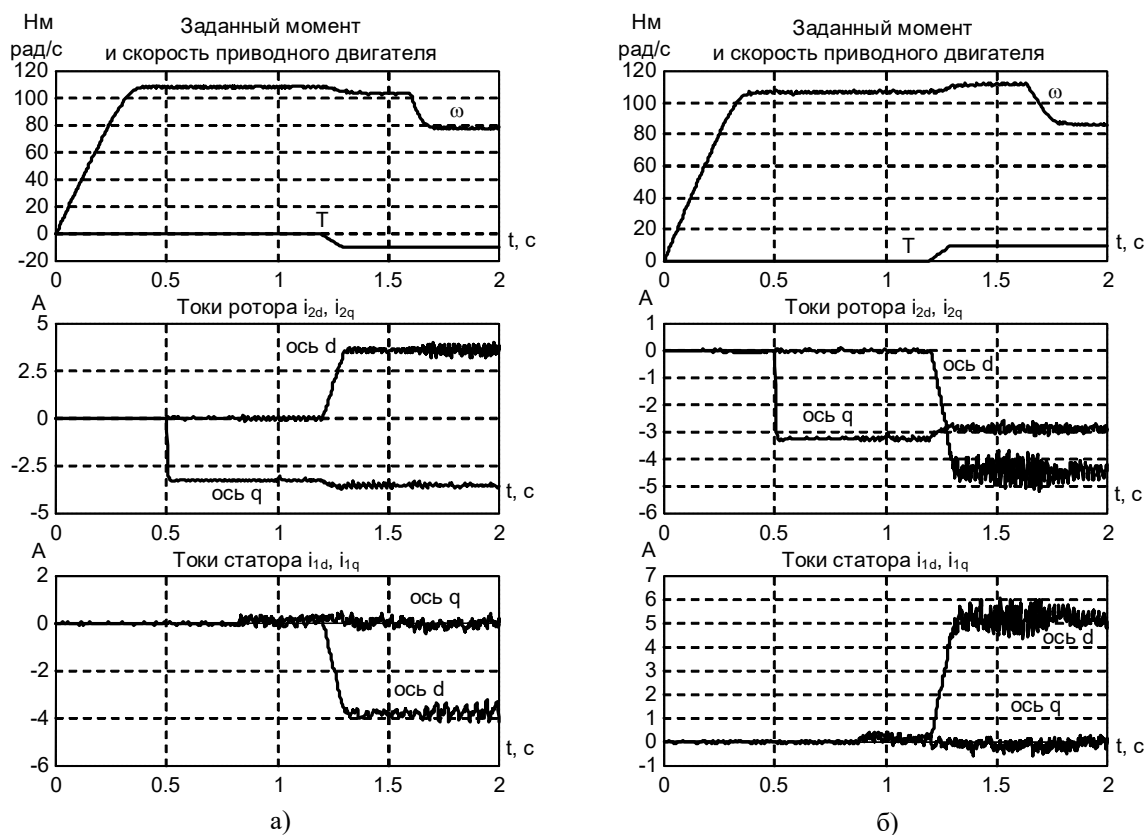


Рис. 5. Переходные процессы при полном цикле работы а) МДП – генератора, б) МДП – двигателя.

На Рис. 6 представлены результаты исследования качества отработки заданной угловой скорости. Первоначально алгоритм регулирования скорости был активирован с заданием для угловой скорости равным 110 рад/с. В момент времени  $t = 0.5$  с началась отработка заданной траектории скорости, форма которой представлена на Рис.6. При этом ненагруженная МДП работает на скоростях как выше синхронной, так и ниже, а требуемый динамический момент составляет 80% от номинального. Из представленных результатов видно, что алгоритм регулирования скорости позволяет получить высокое качество отработки траектории заданной угловой скорости с одновременной стабилизацией реактивной мощности статора на нулевом уровне.

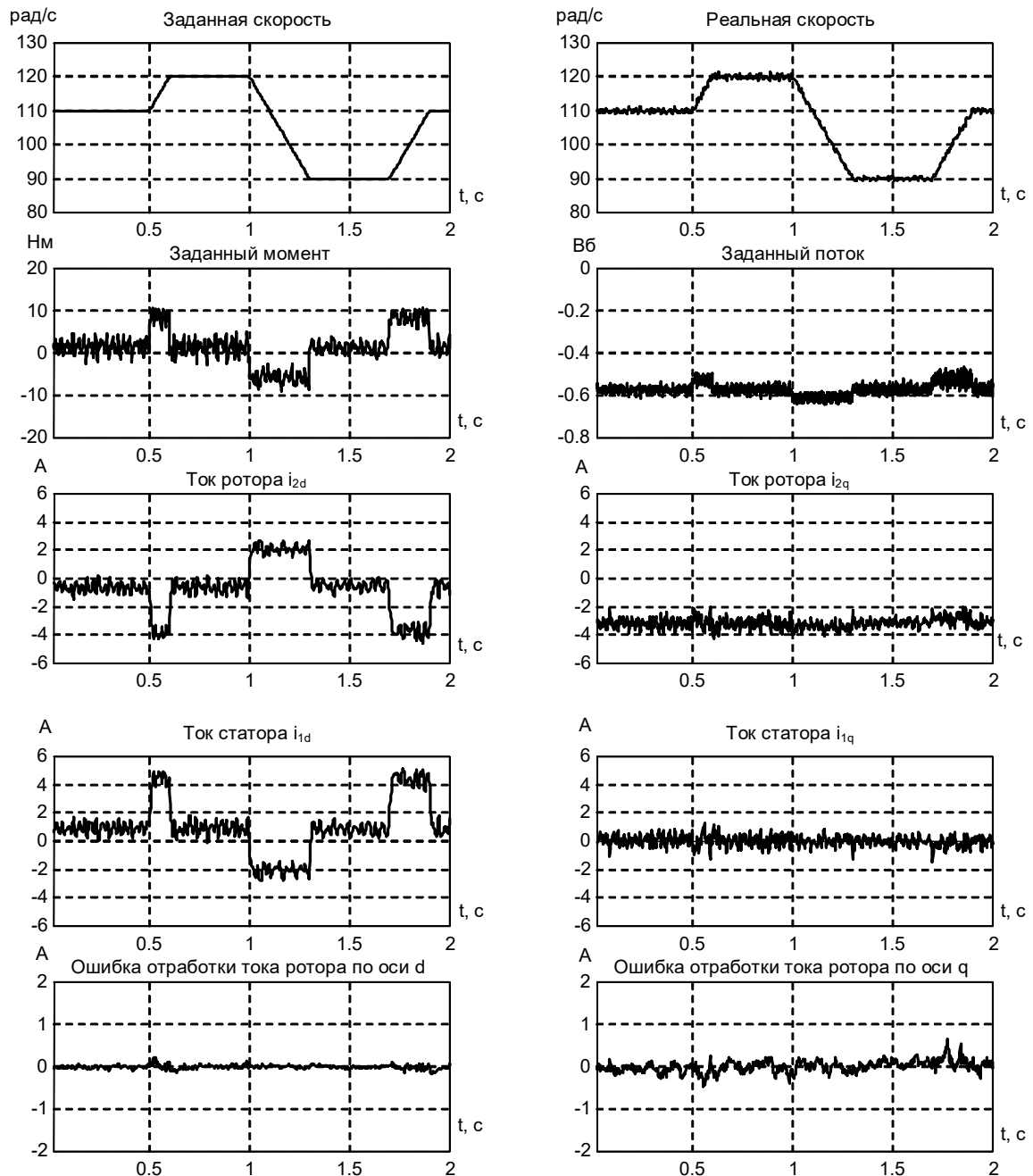


Рис. 6. Переходные процессы при управлении скоростью МДП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные экспериментальные исследования подтверждают высокую эффективность предложенных авторами алгоритмов управления МДП [1], [2]. Алгоритм инициализации позволяет осуществить качественную синхронизацию работающей в режиме генератора МДП с питающей сетью, что в свою очередь гарантирует мягкое, без переходных процессов, подключение к сети. Алгоритм управления моментом МДП позволяет полностью развязать процессы регулирования момента и реактивной мощности статорной цепи, как в генераторном, так и в двигательном режимах. А алгоритм регулирования скорости обеспечивает высокое качество отработки заданной угловой скорости с одновременной стабилизацией реактивной мощности на нулевом уровне.

### Приложение. Параметры МДП.

|                        |               |                            |                              |
|------------------------|---------------|----------------------------|------------------------------|
| Номинальная мощность   | 1 кВт         | Индуктивность статора      | $L_1=0.185$ Гн;              |
| Номинальный ток        | 5.2 А         | Индуктивность ротора       | $L_2=0.185$ Гн;              |
| Номинальное напряжение | 380 В         | Взаимная индуктивность     | $L_m=0.18$ Гн;               |
| Номинальный момент     | 10 Нм         | Число пар полюсов          | $p_n=3$ ;                    |
| Номинальная скорость   | 880 об/мин    | Коэффициент вязкого трения | $\nu=0.45$ кг/с;             |
| Сопротивление статора  | $R_1=4.7$ Ом; | Момент инерции             | $J=0.07$ кг·м <sup>2</sup> . |
| Сопротивление ротора   | $R_2=5.3$ Ом; |                            |                              |

1. *Пересада С.М., Шаповал И.А.* Управление моментом и реактивной мощностью асинхронной машины двойного питания на основе косвенной ориентации по вектору потокосцепления статора. // Техническая электродинамика. – в печати.

2. *Пересада С.М., Король С.В.* Управление скоростью асинхронной машины двойного питания на основе косвенной ориентации по вектору потокосцепления статора. // Техническая электродинамика. – в печати.